

prof. dr hab. inż. Leszek Romański
prof. dr hab. inż. Jerzy Bieniek
dr inż. Piotr Komarnicki
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
ul. Chełmońskiego 37a; 61-530 Wrocław; *email: leszek.romanski@up.wroc.pl, tel. 508 720 502
mgr inż. Marcin Dębowski
Wydział Mechaniczno – Energetyczny, Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,
dr hab. inż. Jerzy Detyna prof. PWr
Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

BADANIA EKSPLOATACYJNE DWUWIRNIKOWEJ MINI ELEKTROWNI WIATROWEJ

Słowa kluczowe: eksploatacja, mini elektrownia wiatrowa dwuśmigłowa, tunel aerodynamiczny

Streszczenie:

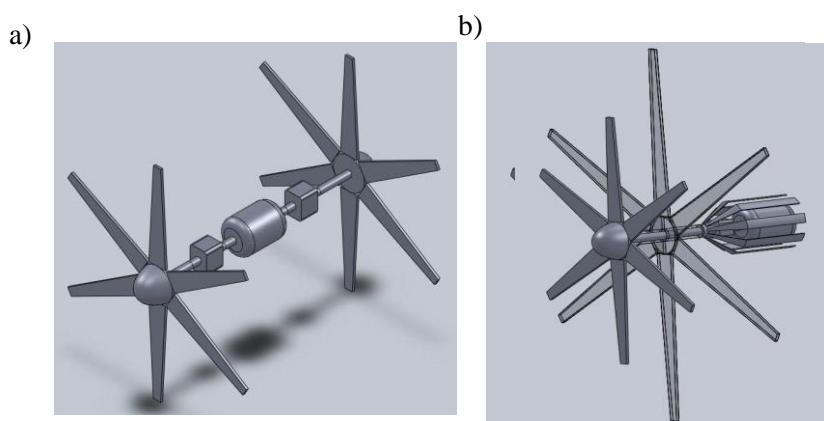
W artykule przedstawiono wyniki badań dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym oraz w terenie. W pierwszym etapie testowano zbudowany w celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych tunel aerodynamiczny o konstrukcji otwartej. Wyznaczony współczynnik nierównomierności strugi powietrza przy prędkości nominalnej wynosił 1,7%, natomiast wskaźnik intensywności turbulencji w całym zakresie pomiarowym zawierał się w granicach 1,2-1,8%. Budując mini elektrownię wiatrową wyposażono ją w wirniki w których zastosowano nową konstrukcję łopat. Zastosowane łopaty w porównaniu do zbliżonej konstrukcji łopat stosowanych w mini elektrowniach dostępnych na rynku charakteryzowały się sprawnością wynoszącą 0,28. Po wykonanych badaniach eksploatacyjnych w tunelu aerodynamicznym uzyskane wyniki poddano ocenie statystycznej z wykorzystaniem współczynników korelacji liniowej Pearsona oraz rangi Spearmana. Zbadano zależności między zmienną zależną (moc P) oraz zmiennymi niezależnymi (średnie prędkości strugi powietrza V , kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika α_1 , kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika α_2 , odległości pomiędzy wirnikami l). Na podstawie analizy, zgodnie z oczekiwaniem, stwierdzono, że najsilniejsza korelacja występuje w odniesieniu do prędkości strugi powietrza. Wpływ na moc mają także kąty zaklinowania na obu wirnikach, natomiast nie stwierdzono takiego wpływu w przypadku zmian odległości pomiędzy wirnikami turbiny. Badania w terenie potwierdziły ustalenia i spostrzeżenia poczynione w tunelu aerodynamicznym.

1. Wprowadzenie i cel pracy

Jak wynika ze wzoru na moc generowaną przez elektrownię wiatrową największy wpływ ma prędkość napływającego na wirnik turbiny strumienia powietrza (prędkość w trzeciej potęgze) oraz średnica samego wirnika (druga potęga). W pierwszym przypadku, wyłączając sytuację kiedy elektrownia pracuje w dyfuzorze, jesteśmy uzależnieni od sił przyrody, gdyż nie mamy praktycznie żadnego wpływu na energię wiatru. W przypadku drugim, wydaje się, że rezerwy proste, zostały już wyczerpane, gdyż zwiększanie średnicy wirników powyżej 140m napotyka na wielkie problemy technologiczne i bardzo duży, nieproporcjonalny wzrost kosztów wytwarzania [19]. Tańszym rozwiązaniem, wpływającym też na efektywność pracy turbiny jest poprawa konstrukcji samych łopat. Dąży się do takiej zmiany jej geometrii i powierzchni aby w czasie obrotów wirnika powstawała na nich, przy tej samej prędkości wiatru, coraz to większa siła nośna [3, 10, 16, 26].

Ostatnio wielu konstruktorów pracuje nad problemem dodatkowego wykorzystania energii strumienia powietrza, który po wykonanej pracy znajduje się już poza wirnikiem turbiny wiatrowej. Przykładem konstrukcji, w której może być wykorzystana ta „odpadowa energia” jest elektrownia wiatrowa o dwóch wirnikach umieszczonych w osi generatora elektrycznego [18, 21, 22, 23, 24]. Możliwe są dwie wersje takiego rozwiązania (rys.1).

Przy rozwiązaniu pierwszym (rys.1a) zespół posiada dwa wirniki, obracające się w tym samym kierunku. Prędkość obrotowa wału jest zwiększana poprzez zastosowane przekładnie. Dzięki napędzaniu prądnika generatora elektrycznego przez dwa wirniki, wydajność generatora się zwiększa, co jest szczególnie odczuwane przy słabych warunkach wiatrowych.

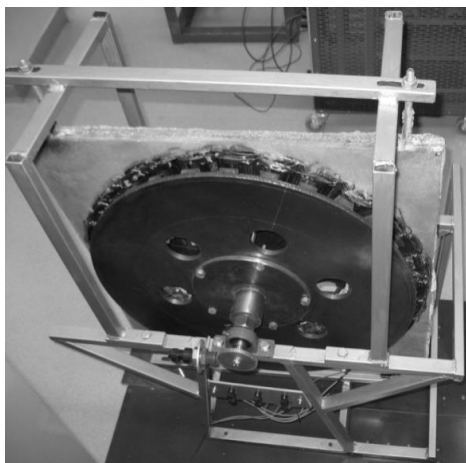


Rys.1. Ustawienie turbin wiatrowych dwuwirnikowych względem siebie: a- wirniki umieszczone po obu stronach prądnicy, b- wirniki umieszczone osiowo jeden za drugim [17]

W układzie tym turbiny mogą pracować także przeciwnie co zwiększa efektywność takiego układu. Druga koncepcja to konstrukcja (rys.1b), w której przed generatorem i w jego osi znajdują się dwa wirniki. Zespoły wirników przechwytyją masę powietrza przepływającą z jednego kierunku. Konstrukcja elektrowni jest bez przekładniowa a poszczególne elementy prądnicy (stojan, wirnik) napędzane są różnymi turbinami. Pod wpływem działania przepływającej masy powietrza na wirniki różniące się kątami pochylenia łopat, obracają się one w przeciwnych kierunkach. Dzięki temu względna prędkość obrotu wirnika jest większa niż w konstrukcji jednośmigłowej. W efekcie powinna wzrosnąć generowana przez taką elektrownię moc.

Do budowy elektrowni wiatrowych małej mocy wykorzystuje się między innymi generatory tarczowe z magnesami trwałymi nazywane także prądnicami wolnobieżnymi. Ich zastosowanie pozwala wyeliminować lub zmniejszyć przełożenie przekładni mechanicznej. Obniża to poziom hałasu, zmniejsza koszt układu oraz powiększa jego sprawność. Prądnice wolnobieżne wykonywane są jako cylindryczne lub tarczowe. Przykładowe rozwiązanie prądnicy tarczowej z konstrukcją bez rdzenia w stojanie, przedstawiono na rysunku 2. Ma ona

stosunkowo prostą budowę, nie występują w niej straty w rdzeniu stojana, a tym samym zwiększa się jej sprawność [13, 14].



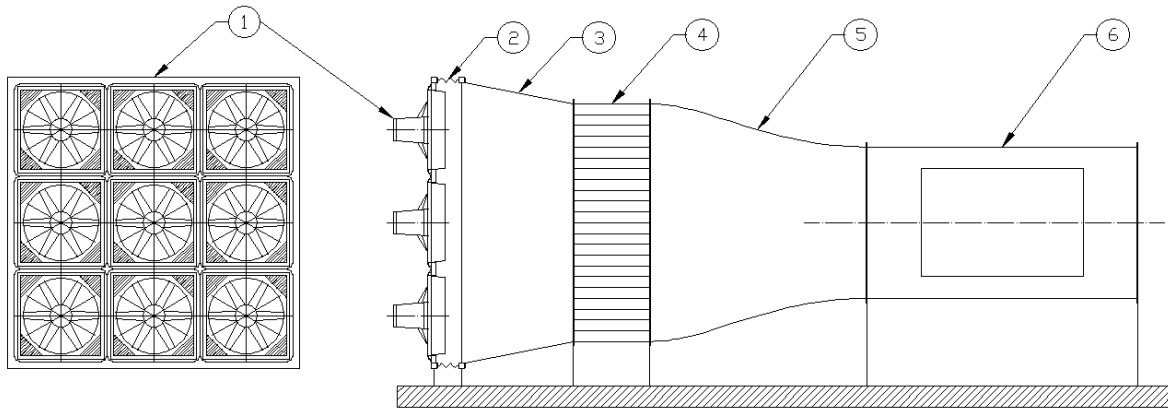
Rys.2. Model prądnicy wolnobieżnej tarczowej [14]

W oparciu o rozeznanie literaturowe i doświadczenie autorów zaprojektowano i zbudowano dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową, w której jeden wirnik napędzał pędnik a drugi w przeciwnym kierunku stojan generatora. Badania eksploatacyjne przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym oraz w warunkach naturalnych w rejonie pogórza sudeckiego.

2. Obiekt i metodyka badań

W prowadzonych przez Zespół badaniach tunel aerodynamiczny był podstawowym stanowiskiem eksperymentalnym wykorzystywanym do oceny pracy różnych obiektów aerodynamicznych, w tym również mini elektrowni wiatrowych. Projekt a następnie konstrukcja tunelu powstała w wyniku zebrania szeregu informacji dostępnych w literaturze naukowej [4, 5, 7, 8, 9] oraz uzyskanych wskazówek udzielonych przez specjalistów z kilku ośrodków badawczych. Kształt zastosowanego w konstrukcji tunelu konfuzora Witoszyńskiego otrzymano w wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych [1, 6, 11]. Połączenie prostownicy strugi oraz konfuzora Witoszyńskiego pozwoliło uzyskać wzrost prędkości powietrza w komorze pomiarowej, z jednocześnie bardziej skoncentrowanym i równomiernym strumieniem. Podstawowe wymiary geometryczne tunelu wynosiły odpowiednio: wlot o przekroju kwadratowym 2,5x2,5m, długość całkowita 7m, wylot stanowiła komora pomiarowa o średnicy 1,4m (rys.3). Zastosowanie dziewięciu niezależnie regulowanych wentylatorów osiowych o mocach jednostkowych 2,2kW, umożliwiło osiągnięcie prędkości strumienia powietrza w przestrzeni pomiarowej dochodzącej do $17,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, przy ciśnieniu dynamicznym około 200 Pa oraz uzyskanie wyrównanego gradientu

prędkości strugi w przekroju poprzecznym komory pomiarowej. Sterowanie pracą wentylatorów polegało na zmianie prędkości obrotowej wirników, którą uzyskiwano poprzez regulację częstotliwości falowników w zakresie 15-50Hz z możliwością stopniowania co 0,01Hz [15].

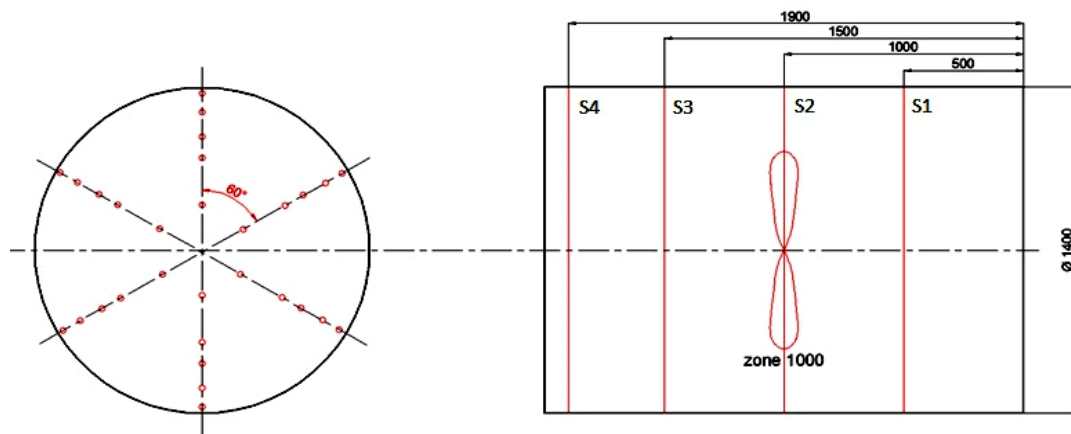


Rys.3. Schemat tunelu aerodynamicznego o otwartym przepływie powietrza: 1– stelaż z sekcją wentylatorów, 2– tłumik drgań, 3– redukcja symetryczna o przekroju kwadratowym, 4– ulownica strumienia, 5– konfuzor Witoszyńskiego, 6– komora pomiarowa z otworem rewizyjnym [15]

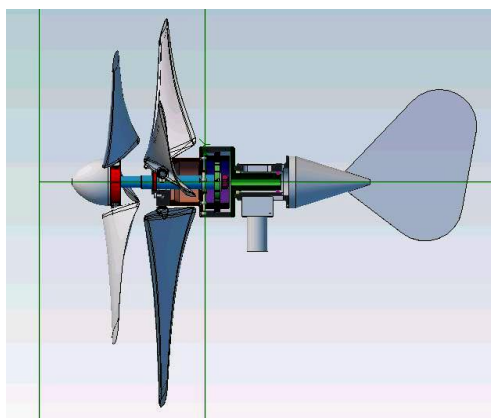
Testowanie tunelu aerodynamicznego wykonano dla pustej komory pomiarowej. Badania przepływu powietrza w tunelu przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczono podstawowe parametry strugi, w tym ciśnienie, prędkość oraz wskaźniki jakościowe tunelu: rozkład równomierności prędkości w komorze pomiarowej oraz wskaźniki intensywności turbulencji, które odniesiono do średnich arytmetycznych prędkości. W drugim etapie zbadano wpływ regulacji pracy poszczególnych wentylatorów na rozkład pól prędkości w strefie pomiarowej tunelu aerodynamicznego. Pomiary rozkładu równomierności prędkości strugi w komorze pomiarowej przeprowadzono w oparciu o metodę trawersowania wg normy PN-ISO 5221. Położenie punktów pomiarowych w kanale pomiarowym o przekroju okrągłym dobrano na podstawie zalecanej w normie metody Log-Czebyszewa. Zgodnie z powyższą metodą, kanał podzielono na koncentryczne pierścienie. W związku z tym, że kanał posiadał średnicę większą niż 0,25m został podzielony na pięć pierścieni. Środek kanału liczono względem osi symetrii przewodu. Na każdym z pierścieni dokonano jednakowej liczby pomiarów w celu uzyskania właściwej średniej. Na 3 osiach nachylonych względem siebie pod kątem 60° rozmieszczono 10 punktów pomiarowych (rys.4). Badania rozkładu pól prędkości strumienia przeprowadzono w wybranych 4 strefach pomiarowych S1, S2, S3, S4 oddalonych od krawędzi wylotu odpowiednio 0,5, 1,0, 1,5, i 1,9m [15].

Schemat badanej siłowni dwuwirnikowej przedstawiono na rysunku 5. Model funkcjonalny turbiny przystosowany jest do szybkiego montażu różnego kształtu łopat, ustawienia ich kąta natarcia oraz zmiany położenia wirnika tylnego względem wirnika przedniego. Kąt

zaklinowania pierwszej łopaty (parametr α_1) mógł przyjąć sześć wartości z przedziału $125^\circ - 150^\circ$, ze skokiem co 5° . Kąt zaklinowania drugiej łopaty (parametr α_2) również mógł przyjąć sześć wartości z przedziału $30^\circ - 55^\circ$, ze skokiem co 5° . Odległość między wirnikami była regulowana w zakresie od 0,105m do 0,14m, ze skokiem co 5mm.



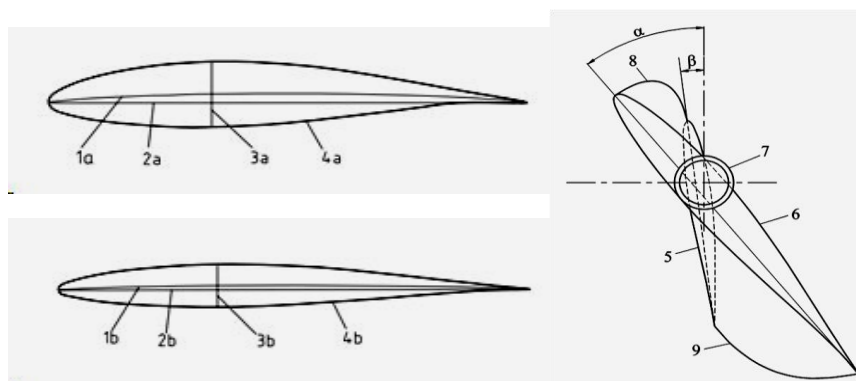
Rys.4. Schemat rozmieszczenia punktów sondowania przy trawersowaniu poprzecznego przekroju kanału oraz położenie stref pomiarowych na całej długości komory [15]



Rys.5. Schemat siłowni wiatrowej dwuwirnikowej wykonanej w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (opracowanie własne)

W trakcie badań zostały zaprojektowane i wykonane nowe rodzaje wysoko sprawnych aerodynamicznie łopat badanej siłowni wiatrowej. Dobór odpowiednich profili łopat został poprzedzony analizą porównawczą wielu różnych kształtów zamieszczonych w literaturze [2, 12, 20, 23, 25], wykonanymi modelami numerycznymi, oraz w oparciu o własne doświadczenia modelarskie. Łopaty wykonano przy zastosowaniu technologii CNC i zbudowano je z kilku warstw materiału - kompozytu epoksydowo-szklanego a ich konstrukcje oparte były na dwóch wydajnych profilach aerodynamicznych. Na rysunkach 6 przedstawiono przykładowy jeden z profili łopaty zwichrowanej NACA 63-415-NACA 63-210.

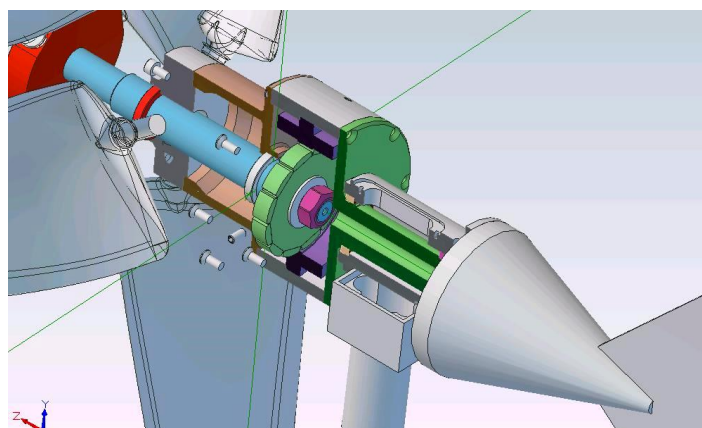
Ważnym elementem każdej elektrowni wiatrowej jest generator (prądnicą), którego zadaniem jest wytwarzanie energii elektrycznej na skutek obrotów łopat. W badanej mini elektrowni zastosowano rozwiązanie, w którym niezależnie obracają się w przeciwnych kierunkach



Rys. 6. Zarysy profilu początkowego NACA 63-415 i końcowego NACA 63-210 oraz widok od strony trzpienia mocującego łopaty: α - kąt zaklinowania profilu początkowego, β - kąt zaklinowania profilu końcowego, 1a, 1b – szkieletowa profilu, 2a, 2b - cięciwa profilu, 3a, 3b – grubość profilu, 4a, 4b – krzywa profilu, 5 – płaszczyzna profilu końcowego NACA 63-210, 6 – płaszczyzna profilu początkowego NACA 63-415, 7 – trzpień mocujący, 8 – krawędź natarcia, 9 – krawędź spływu (opracowanie własne)

wirnik oraz stojan. Założono, że będą się one obracać w przeciwnych kierunkach. Na rysunku 7 przedstawiono model prototypu generatora stanowiący integralną całość mini elektrowni wiatrowej w której wykorzystano rozwiązanie z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi.

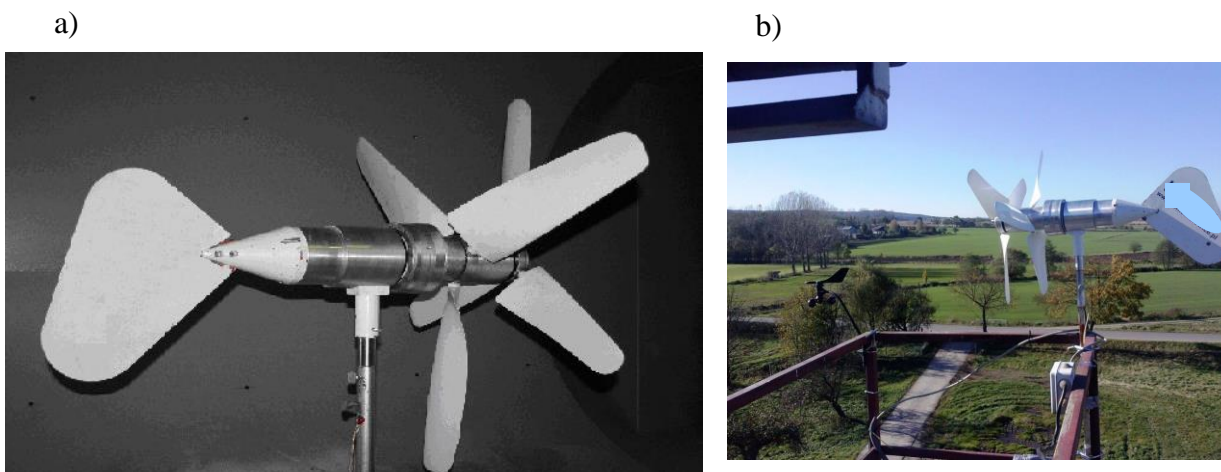
Badania eksploatacyjne dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej przeprowadzone zostały w dwóch etapach (rys.8): pierwszy w tunelu aerodynamicznym (rys.8a) przy założonych stałych parametrach pracy oraz drugi w warunkach terenowych (rys.8b), w tym przypadku we wsi Wiry k/Sobótki. Z wieloletnich obserwacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej wynika, że średnia prędkość wiatru w regionie Dolnego Śląska wynosi $3,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a roczne zasoby energii wiatru są na poziomie $1\,000\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Biorąc pod uwagę rozkład prędkości



Rys.7. Schemat konstrukcji generatora dwuwirnikowej siłowni wiatrowej (opracowanie własne)

wiatru w poszczególnych miesiącach roku jak i sprawność konwersji energii wiatru na energię elektryczną wynoszącą ok. 20% i przyjęto, że z 1m^2 strugi wiatru pozyska się dziennie tylko 0,53kWh. Elektrownia wiatrowa podłączona była do regulatora napięcia, akumulatora i transmitera w którym gromadzono dane o energii generowanej w turbinie (napięcie, natężenie prądu) oraz dane ze stacji meteorologicznej zainstalowanej w pobliżu elektrowni wiatrowej.

Do analiz statystycznych wykorzystano pakiet statystyczny Statistica v.10 firmy StatSoft.



Rys.8. Widok badanej mini elektrowni w czasie eksploatacji: a- w tunelu aerodynamicznym, b- w terenie (opracowanie własne)

3. Wyniki badań

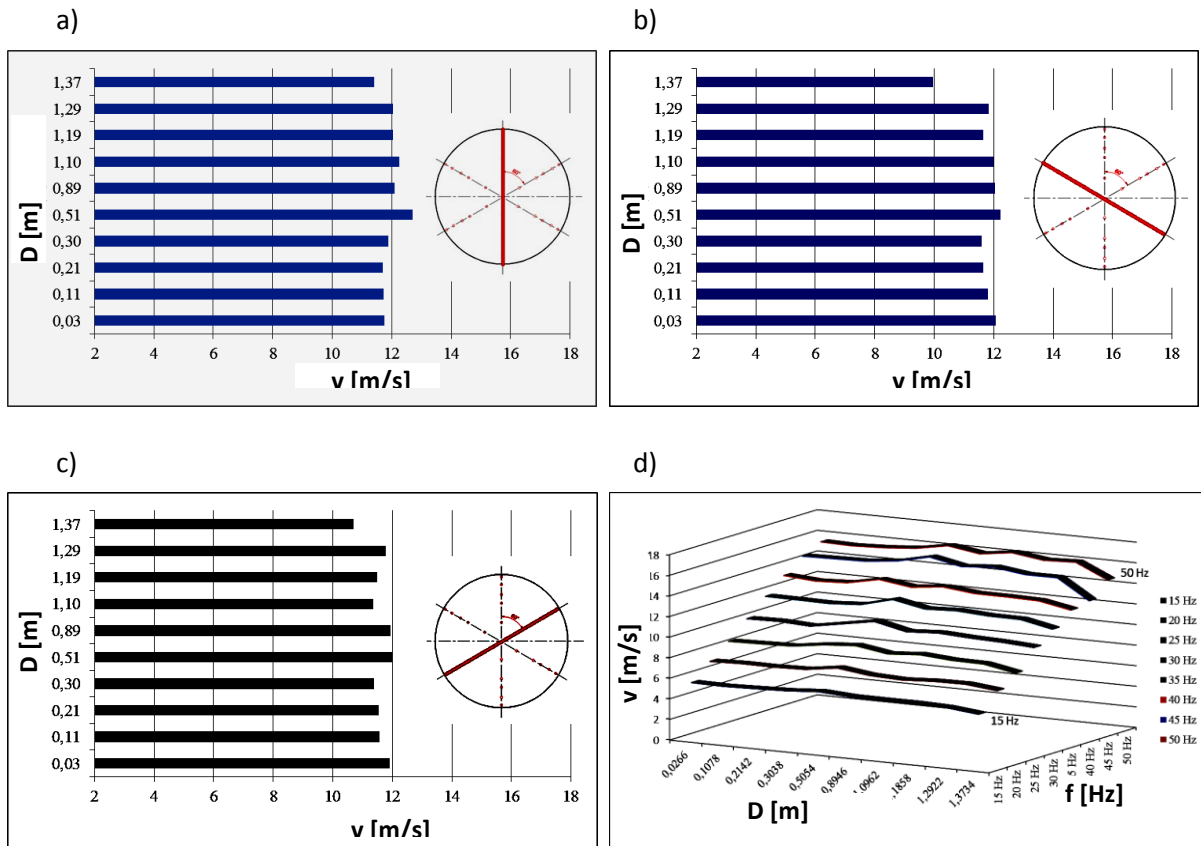
Z uwagi na fakt, że elektrownia wiatrowa uzyskuje znamionową moc przy prędkościach wiatru na poziomie $10\text{-}12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, w artykule przedstawiono przykładowe profile strumienia powietrza zmierzone w komorze pomiarowej, odpowiadające tym prędkościom (rys.9).

Zaprezentowane rozkłady (rys. 9abc) odpowiadały nastawom napięcia zasilającego wentylatory (częstotliwość na poziomie 35Hz). Na podstawie uzyskanych bazowych rozkładów zaobserwowano, że strumień powietrza cechował się nieznaczną nieregularnością, posiadał zwiększone wartości prędkości w okolicach osi komory pomiarowej.

Maksymalna lokalna wartość ciśnienia dynamicznego wynosiła 198Pa i uzyskano ją przy nastawie częstotliwości napięcia zasilającego silniki wentylatorów na wartość 50Hz. Obliczona prędkość strumienia powietrza wyniosła $17,55\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Minimalne lokalne wartości ciśnienia dynamicznego dla nastawy 15Hz wyniosły 17Pa, obliczona zaś prędkość strugi $5,14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wpływ odległości stref pomiarowych S1-S4 na profil prędkości strugi przedstawiono na rysunku 10.

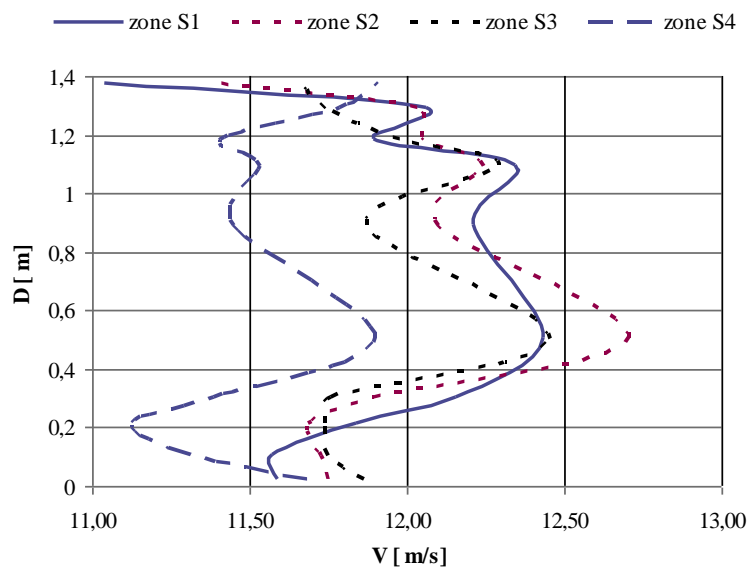
Wyznaczony wskaźnik intensywności turbulencji zawierał się w granicach 1,2-1,8% [15]. Porównanie pracy mini elektrowni wiatrowej o wymiennych wirnikach składających się z

łopat o różnych profilach, zostało oparte na zestawieniu wykreślonych charakterystyk mocy



Rys.9. Przykładowe rozkłady prędkości strumienia powietrza w przestrzeni komory pomiarowej dla nastawy częstotliwości wentylatorów 35Hz w strefie S2: a – pomiary dla osi 90° , b – pomiary dla osi 150° , c – pomiary dla osi 210° , d – charakterystyka rozkładów prędkości dla pełnego zakresu nastaw wentylatorów (opracowanie własne)

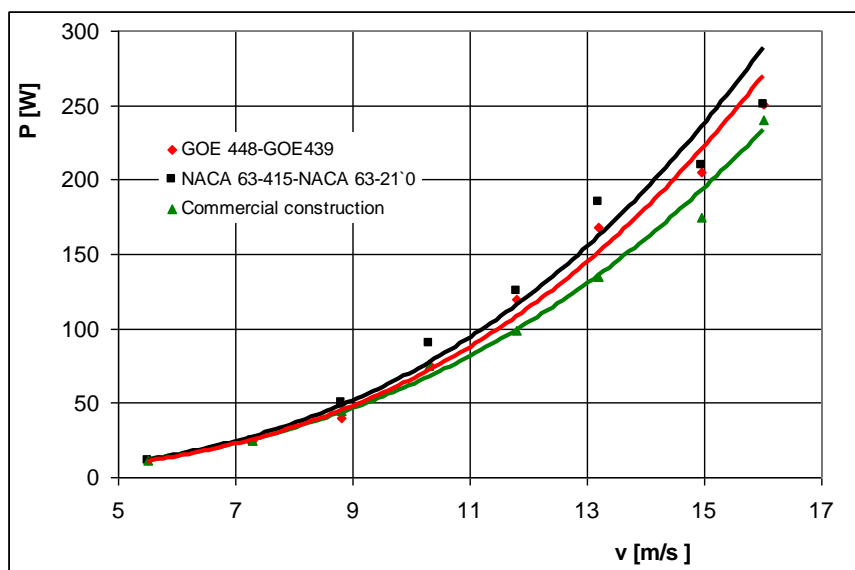
elektrycznej. Wyniki badań nowych konstrukcji łopat w odniesieniu do konstrukcji fabrycznej przedstawiono na rysunku 11. Testowanie przeprowadzono w każdym przypadku dla 5



Rys.10. Bazowe profile prędkości strumienia powietrza dla 4 różnych stref pomiarowych przy nastawie częstotliwości pracy wentylatorów 35Hz (opracowanie własne)

różnych kątów zaklinowania. Na wykresie zamieszczono krzywe mocy charakteryzujące daną łopatkę przy „optymalnym” kącie zaklinowania. Obydwie nowe konstrukcje łopat wirników okazały się wydajniejsze od wirnika fabrycznego (tab.1).

Uzyskana sprawność mini elektrowni wiatrowej odniesiona do mocy strumienia wiatru na wejściu do wirnika w przypadku mini elektrowni fabrycznej wynosiła 0,21 przy deklarowanej w instrukcji obsługi urządzenia 0,25. W przypadku elektrowni wiatrowej z wirnikiem o łopatach z profilem GOE wynosiła 0,25. Porównując natomiast wartości mocy wszystkich



Rys.11. Charakterystyki mocy badanej mini elektrowni wiatrowej wyposażanej w różne konstrukcje łopat (opracowanie własne)

badanych wirników przy $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, czyli prędkości wiatru uznawanej jako znamionową, można zauważyć, że obydwie konstrukcje generują więcej energii elektrycznej: odpowiednio dla łopat o profilu GOE 19,5% oraz, NACA 23,7%. Godnym podkreślenia jest fakt, że nowe wirniki charakteryzują się wyższą generowaną mocą w całym zakresie badanych prędkości. Wirnik o łopatach NACA osiągał sprawność 0,28.

Tabela 1. Współczynniki sprawności badanych siłowni (opracowanie własne)

Nazwa siłowni lub profilu	Średnica łopat wirnika (m)	Moc wiatru (W) przy $V=12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Uzyskana moc przez wiatrak (W)	Uzyskana sprawność (-)
JSW-750-12	0,75	471,4	97	0,21
GOE – 448/439	0,75	471,4	120	0,25
NACA 63-415/210	0,75	471,4	131	0,28

Dla optymalnego ustawienia wirników do badań eksploatacyjnych terenowych, konieczne było przeprowadzenie analizy statystycznej w oparciu o wyniki uzyskane z badań w tunelu aerodynamicznym. Chodziło głównie o wyznaczenie statystycznie istotnej zależności

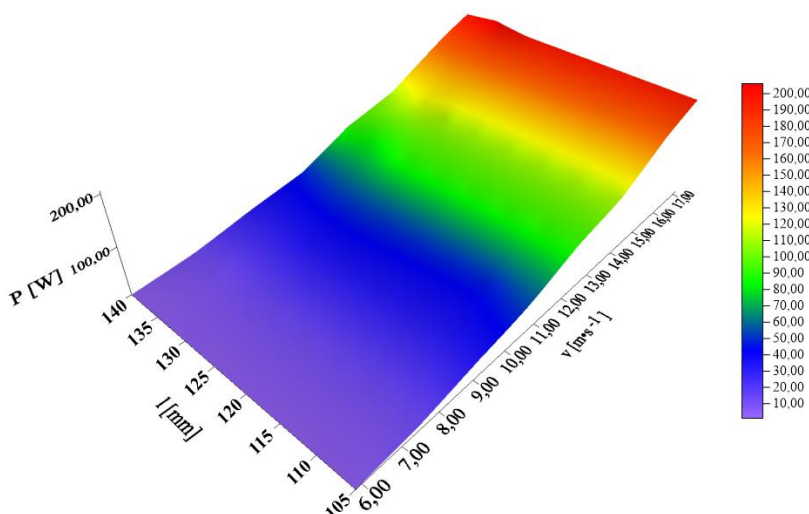
między zmienną zależną (moc P) oraz zmiennymi niezależnymi (średnie prędkości strugi powietrza V , kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika α_1 , kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika α_2 , odległości pomiędzy wirnikami l) z wykorzystaniem współczynników korelacji liniowej Pearsona oraz korelacji rang Spearmana. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki Pearsona oraz Spearmana określające statystycznie istotną korelację pomiędzy zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi dla elektrowni dwuwirnikowej (opracowanie własne)

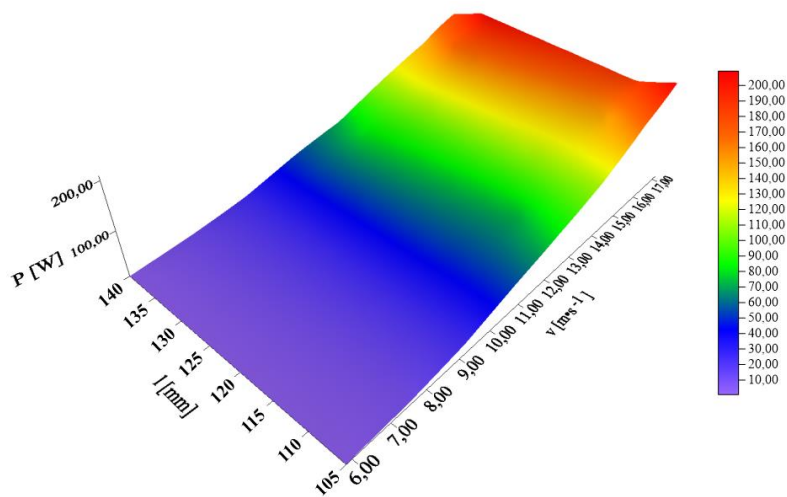
Zmienna niezależna	Współczynniki korelacji liniowej Pearsona	Współczynnik korelacji rang Spearmana
V	0,90	0,95
α_1	-0,16	-0,14
α_2	0,17	0,13
l	0,02	0,02

Na podstawie analizy można stwierdzić, że najsilniejsza korelacja (współczynniki w obu przypadkach $\geq 0,90$) występuje w przypadku prędkości strugi powietrza, co jest logiczne i potwierdzone badaniami. Słaba korelacja ujemna występuje w przypadku kąta zaklinowania łopat pierwszego wirnika. Ujemne wartości współczynników sugerują, że zmniejszenie wartości kąta zaklinowania powinno skutkować wzrostem generowanej mocy. Również słaba korelacja, ale dodatnia, występuje w przypadku kąta zaklinowania łopat drugiego wirnika. Dodatnie wartości współczynników opisują wzrost wartości generowanej mocy wraz ze wzrostem wartości kąta zaklinowania łopat. Statystycznie istotny brak korelacji, w przypadku obu wskaźników, występuje w odniesieniu do odległości pomiędzy wirnikami. Ilustracją braku tej korelacji są trzy przykładowe trójwymiarowe wykresy przedstawione na rysunkach: 12 – 14. Sporządzono je jako $P = f(l; v)$ dla:

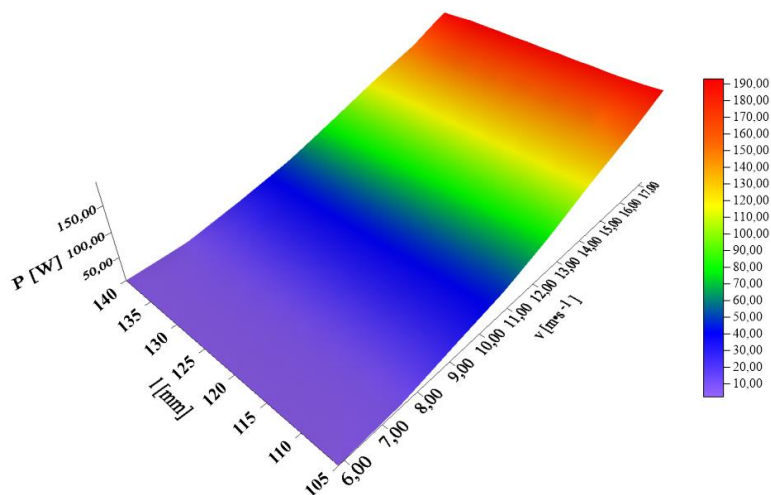
$\alpha_1 = 125^\circ$ i $\alpha_2 = 50^\circ$; $\alpha_1 = 130^\circ$ i $\alpha_2 = 55^\circ$; $\alpha_1 = 125^\circ$ i $\alpha_2 = 40^\circ$.



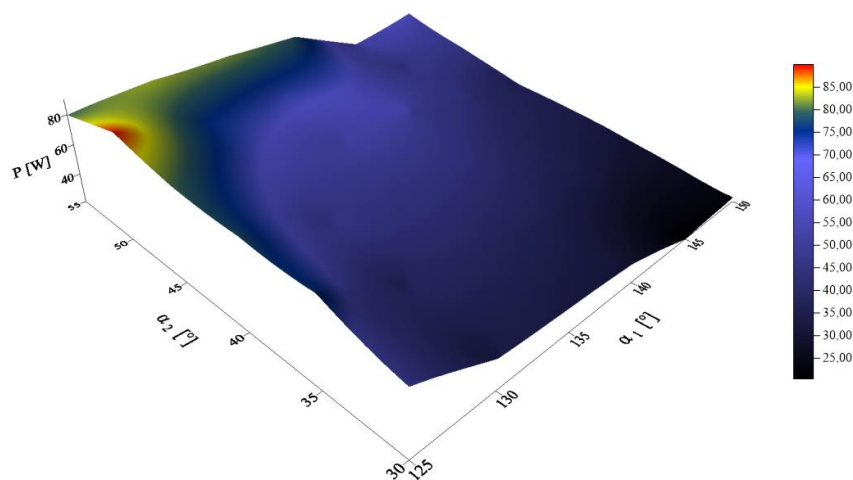
Rys.12. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopat $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 50^\circ$ (opracowanie własne)



Rys.13. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopatek $\alpha_1 = 130^\circ$ oraz $\alpha_2 = 55^\circ$ (opracowanie własne)



Rys.14. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopatek $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 40^\circ$ (opracowanie własne)



Rys.15. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (opracowanie własne)

Z analizy danych na tych rysunkach wynika, że prędkość strugi powietrza w sposób istotny wpływa na moc generowaną przez elektrownię wiatrową, natomiast wpływu takiego nie ma odległość pomiędzy wirnikami. Odległość ta z uwagi na zwartość konstrukcji powinna być jak najmniejsza, z zachowaniem na tyle bezpiecznej odległości pomiędzy nimi aby w przypadku huraganowych wiatrów i odchylania się łopat od pionu nie doszło do wzajemnego ocierania się łopat i w efekcie ich uszkodzenia. W celu określenia optymalnego kąta zaklinowania łopat, z punktu widzenia pozyskiwanej mocy przez elektrownię wiatrową zależności wynikające z funkcji $P=f(\alpha_1; \alpha_2)$ zostały przedstawione w formie graficznej. Utworzono je dla ośmiu prędkości strugi powietrza z zakresu pomiarowego od $5,58$ do $17,17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na rysunku 15 przedstawiono przykładowy wykres dla prędkości strugi $12,41\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zestawienie najkorzystniejszych wartości kątów zaklinowania łopat przy konkretnych wartościach prędkości strumienia powietrza zestawiono w tabeli 3.

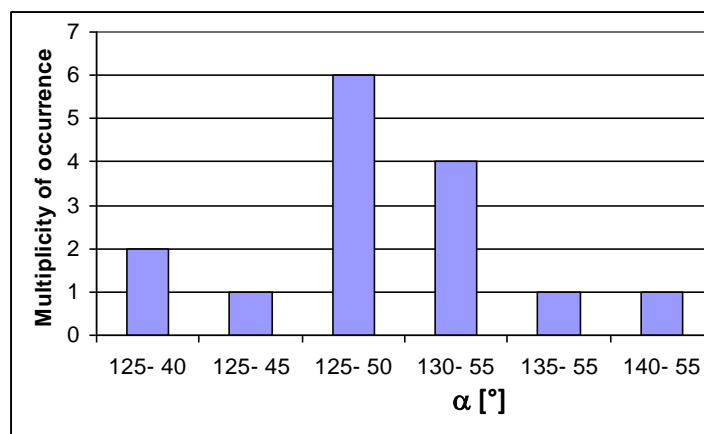
Tabela 3. Zestawienie optymalnych kątów zaklinowania łopat dla danej prędkości strugi powietrza $12,41\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (opracowanie własne)

v_{sr}	α_1	α_2
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	°	°
5,85	125	40
7,53	125	50
9,17	125	50
10,82	125	50
10,82	130	55
12,41	125	50
14,08	125	40
14,08	125	45
14,08	125	50
14,08	130	55
14,08	135	55
14,08	140	55
15,82	125	50
15,82	130	55
17,17	130	55

Histogram (rys. 16) zestawów kątów zaklinowania znacznie ułatwia sformułowanie wniosków ze względu na to, że część tych samych zestawów wartości kątów zaklinowania łopat (α_1, α_2) umożliwia generowanie największej mocy przez elektrownię przy danych prędkościach strugi powietrza.

Po przeanalizowaniu danych dotyczących mocy generowanej, przy określonej prędkości wiatru, dla danych kątów zaklinowania łopat α_1 oraz α_2 można zauważyć, że optymalną konfiguracją są wartości 125° dla łopat pierwszego wirnika oraz 50° dla łopat drugiego wirnika elektrowni wiatrowej. Dopuszczalne są również konfiguracje:

$$\alpha_1 = 130^\circ \text{ i } \alpha_2 = 55^\circ; \alpha_1 = 125^\circ \text{ i } \alpha_2 = 40^\circ.$$



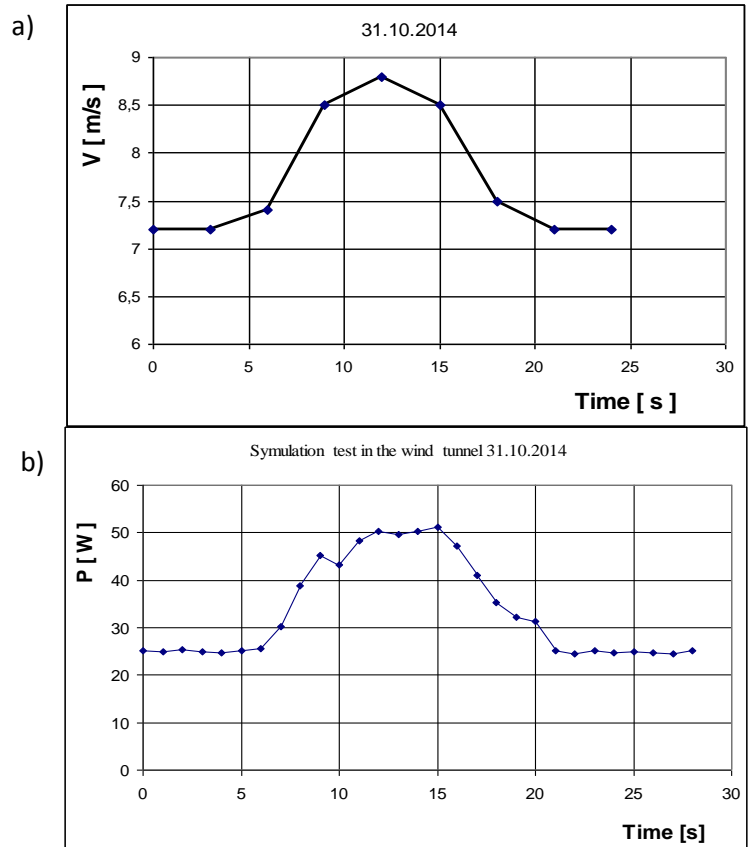
Rys.16. Krotność wystąpienia danego ustawienia kątów zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przy osiągnięciu maksymalnej mocy przez siłownię dla danej prędkości strugi powietrza (opracowanie własne)

Dane techniczne dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Dane techniczne dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej (opracowanie własne)

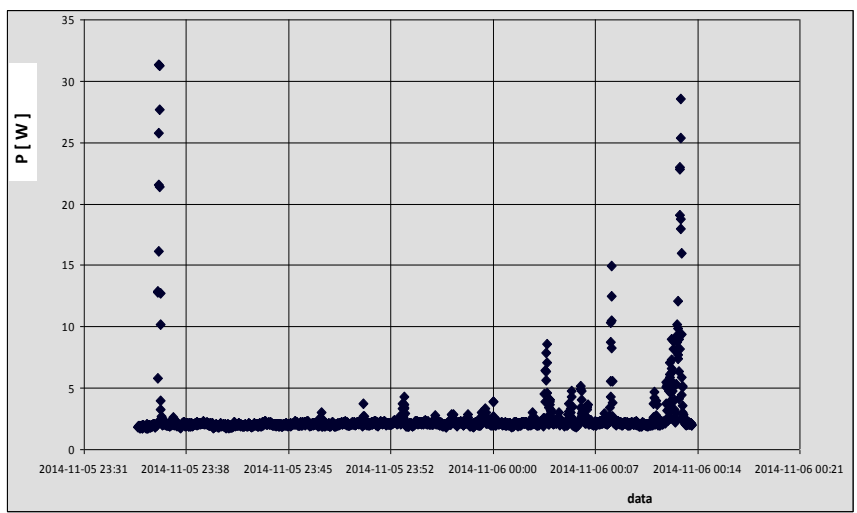
L.p.	Parametry turbiny	Elektrownia wiatrowa
1	Znamionowa prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$)	12,5
2	Maksymalna prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$)	35
3	Minimalna prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$)	2,5
4	Średnica wirnika (m)	0,75/1,15
5	Ilość łopat wirnika (szt.)	3/3
Generator		
6	Typ generatora	Synchroniczny
7	Wzbudzenie	Samowzbudne z magnesami trwałymi
8	Odbiór napięcia	Szczotkowy
9	Maksymalna moc elektryczna (W)	400
10	Znamionowa moc elektryczna (W)	300
11	Napięcie [V]	12
12	Układ regulacji napięcia	wbudowany
13	Napięcia na wyjściu siłowni	przemienne
14	Średnica stojana (m) zew./wew.	0,15/0,092
15	Szerokość stojana (m)	0,055
16	Średnica wirnika (m)	0,09
17	Szerokość wirnika (m)	0,02

Na rysunku 17 przedstawiono wyniki symulacji pracy elektrowni wiatrowej w tunelu aerodynamicznym w czasie zmiennych warunków pracy odzwierciedlających warunki jakie pojawiają się w czasie podmuchów wiatru. Analizując przebieg wygenerowanej mocy elektrycznej przez elektrownię można zauważyć, że moment przyrostu mocy rejestruje się dopiero z opóźnieniem 1-3s w stosunku do początku przyrostu prędkości strugi powietrza (podmuchu).



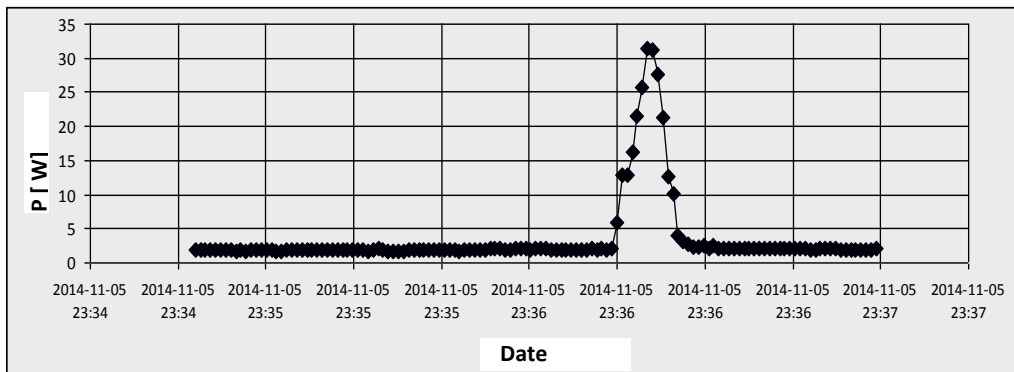
Rys.17. Symulacja pracy elektrowni wiatrowej w tunelu aerodynamicznym : a- przebieg prędkości strug powietrza b- przebieg wygenerowanej mocy (opracowanie własne)

Elektrownia wiatrowa, jak wcześniej wspomniano, pracowała w zmiennych warunkach wiatrowych i umieszczona była na platformie 10m nad powierzchnią. Zapis zmian mocy z dni 5-6.11.2014r. przedstawiono na rysunku 18. W tym czasie zarejestrowano ok. 12 wyraźnych



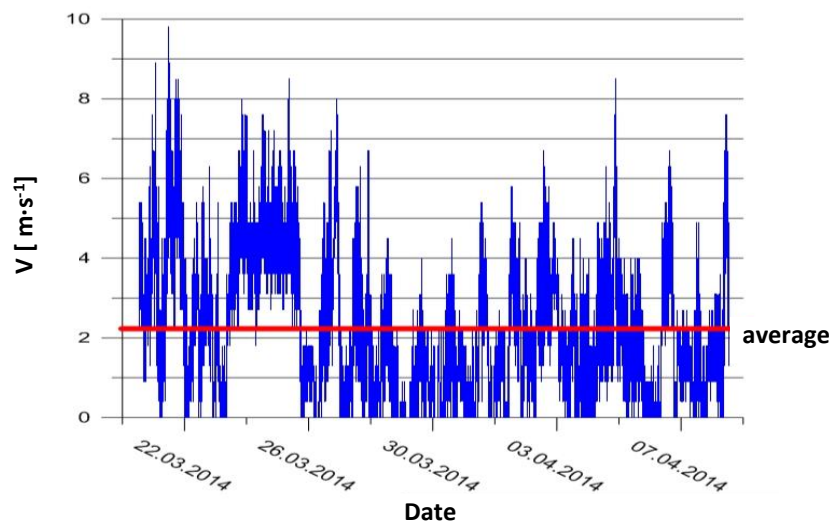
Rys.18. Rozkład generowanej mocy przez dwuwirnikową elektrownię wiatrową w dniach: 5-6.11.2014r. (opracowanie własne)

podmuchów wiatru zobrazowanych na rysunku pikami. Szczegółowy zapis wartości wzrostu mocy generowanej przez generator elektrowni w czasie podmuchu z godziny 23:36, dnia 05.11.2014r. przedstawiono na rysunku 19. W analizowanym przypadku występuje problem



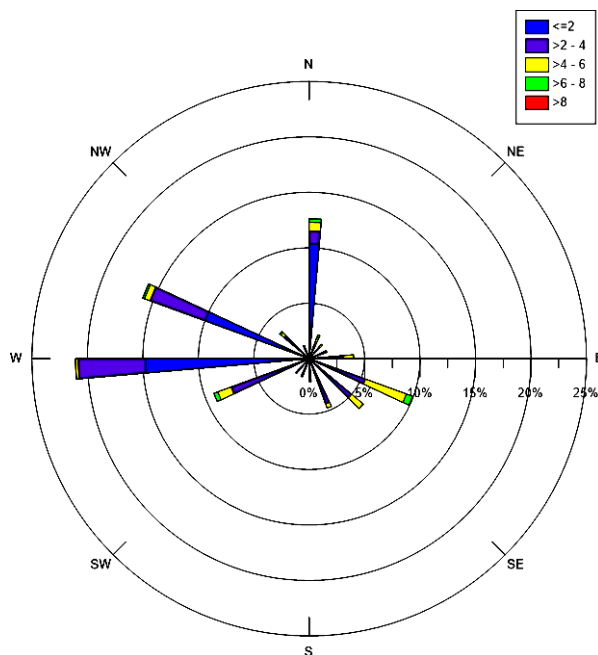
Rys.19. Rozkład generowanej mocy przez dwuwirnikową elektrownię wiatrową w dniu 5.11.2014r. (opracowanie własne)

zapisu a mianowicie rejestrator mocy zapisywał jej wartości z częstością 1 s a zapis prędkości mógł być rejestrowany z częstością 3 s. Spostrzeżenia poczynione podczas badań w tunelu aerodynamicznym są zbieżne z tymi z badań terenowych, gdyż zwyżka mocy następuje po tendencji wzrostowej prędkości wiatru i jest to opóźnienie rzędu 1-2 sekund. Zarejestrowana prędkość wiatru w podmuchu 15 sekundowym wynosiła $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Należy domniemywać, że rzeczywista prędkość była jednak nieco większa, gdyż wartość $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ jest średnią z 3 sekund i tym też należy tłumaczyć w tym przypadku fakt, że pojawienie się maksimum wygenerowanej mocy wystąpiło o sekundę wcześniej niż zarejestrowane maksimum



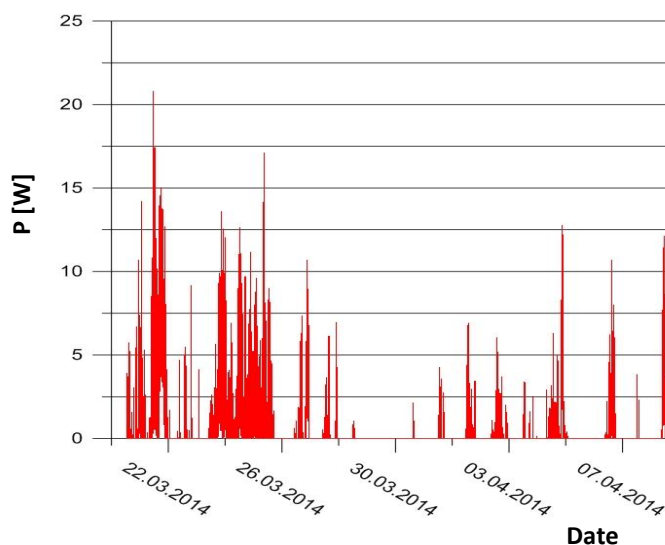
Rys.20. Rozkład prędkości wiatru w miejscu pracy elektrowni wiatrowej (opracowanie własne)

prędkości podmuchu. W czasie badań eksploatacyjnych terenowych prędkość wiatru rzadko przekraczała $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a wyliczona średnia za badany okres wynosiła $2,21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys.20). Jego kierunek i powtarzalność ilustruje przedstawiona na rysunku 21 róża wiatrów. Zgodnie z regułą panującą na Dolnym Śląsku były to głównie wiatry zachodnie lub z kierunku obszaru zachodnio-północnego. Ponad 80% tych wiatrów wiało z prędkością poniżej $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Rys.21. Róża wiatrów z rejonu pracy elektrowni wiatrowej (opracowanie własne)

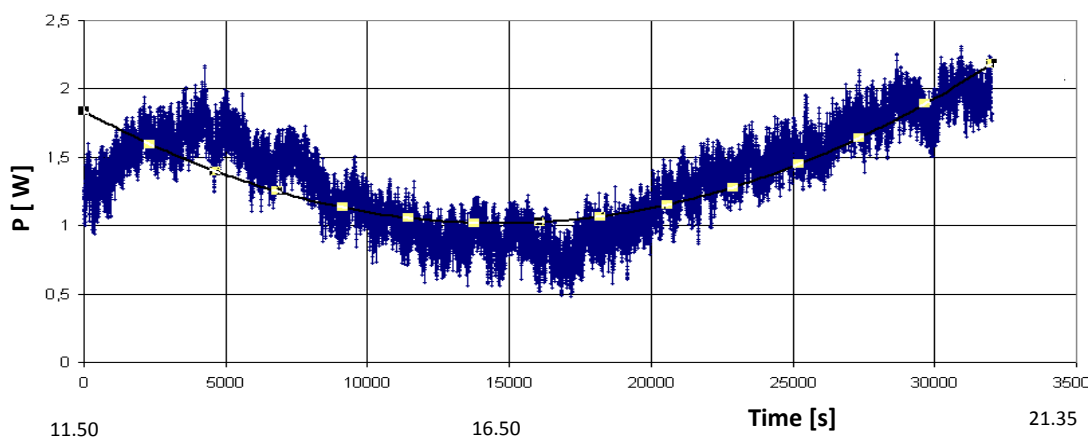
Generowany przez siłownię wiatrową prąd elektryczny bardzo rzadko przekraczał wartość 1A, a za cały badany okres średnia wartość osiągnęła 50mA, co oczywiście rzutuje na wartość



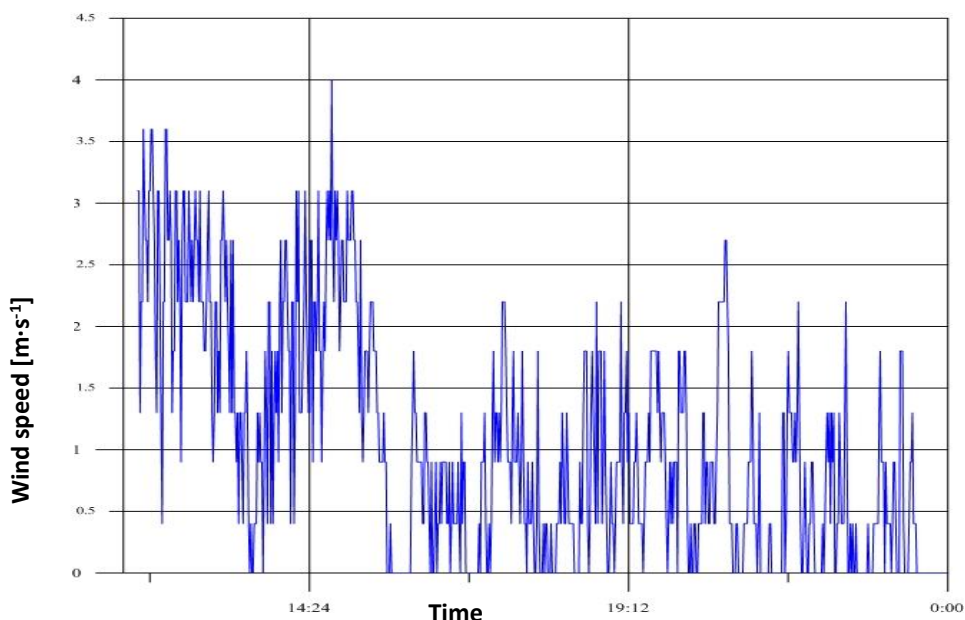
Rys.22. Rozkład generowanej mocy przez dwuwirnikową elektrownię wiatrową (opracowanie własne)

pozyskiwanej mocy której średnia wynosi 0,6W. Rozkład generowanej mocy przez siłownię wiatrową przedstawiono na rysunku 22. Jak wynika z obliczeń dla średniej prędkości wiatru $2,21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ moc wiatru napierającego na wirnik siłowni wiatrowej wynosi ok. 6,6W. Dla tak słabych warunków wiatrowych sprawność konwersji energii wiatru na energię elektryczną wynosiła tylko 9%.

Na rysunkach 23 i 24 przedstawiono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych w październiku 2014r. Analizując dane z tych wykresów można zaobserwować współzależność



Rys.23. Rozkład uzyskiwanej mocy przez elektrownię wiatrową w dniu 29.10.2014r. (opracowanie własne)



Rys.24. Rozkład prędkości wiatru w miejscu pracy elektrowni wiatrowej w dniu 29.10.2014r. (opracowanie własne)

prędkości wiatru i mocy generowanej przez elektrownię. Przykładowo do godziny 13.30 prędkość wiatru rosła, co powodowało też wzrost generowanej mocy, po godzinie 14.30 wraz ze spadkiem prędkości zarejestrowano najmniejszą wygenerowaną moc w tym dniu. W

okresie wzrostu prędkości średnia moc wiatru wynosiła 4,3W (maksymalny błąd bezwzględny pomiaru 1,17W) co w porównaniu do zarejestrowanej wygenerowanej mocy prądu oznaczałoby, że sprawność konwersji turbiny wynosiła 36%, wydaje się to wynikiem dość optymistycznym.

4. Wnioski

1. Zbudowany tunel aerodynamiczny o otwartym przepływie powietrza charakteryzowały: współczynnik nierównomierności strugi powietrza, przy prędkości nominalnej, 1,7%, wskaźnik intensywności turbulencji w całym zakresie pomiarowym zawierał się w granicach 1,2-1,8%.
2. Zaprojektowane na potrzeby modelu mini elektrowni wiatrowej, łopaty wirnika typu NACA zwiększały generowaną moc przez badaną elektrownię wiatrową o 33%.
3. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że moc dwuśmigłowej mini elektrowni wiatrowej istotnie zależy (przy poziomie istotności 0,05) od prędkości strugi powietrza i kątów zaklinowania łopat wirnika, nie zależy natomiast od odległości pomiędzy wirnikami. Wpływ innych czynników nie był określany.
4. W czasie podmuchów wiatru wzrost generowanej przez elektrownię mocy następuje z opóźnieniem w stosunku do zarejestrowanego wzrostu prędkości wiatru po 1-3s.

Praca naukowa finansowana była ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu badawczego N313 789940 pt. „*Analiza pracy dwuśmigłowej minisiłowni wiatrowej*”.

Literatura

1. Arżanikow N S, Malcew W N. Aerodynamika. Warszawa: PWN, 1959.
2. Bak Ch, Fuglsang P, Johansen J, Antoniou I. Wind Tunnel Tests of the NACA 63-415 and a Modified NACA 63-415 Airfoil, Risø-R-1193(EN). 2000.
3. Capuzzi M, Pirrera A, Weaver PM. Structural design of a novel aeroelastically tailored wind turbine blade. *Thin-Walled Structures* 2015; 95: 7-15.
4. Chong TP, Joseph PF, Davies POAL. Design and performance of an open jet wind tunnel for aero-acoustic measurement. *Applied Acoustics* 2009; 70: 605-614.
5. Flaga A. Inżynieria wiatrowa. Warszawa: Wydawnictwo Arkady, 2008.
6. Goliński J A, Troskoleński A T. Strumienice: teoria i konstrukcja. Warszawa: WNT, 1979.
7. Gumuła S, Knap T, Strzelczyk P, Szczerba Z. Energetyka wiatrowa. Kraków: Wyd. AGH, 2006.
8. Gumuła S, Mikoś M, Pytel K, Stępniewski Ł. Kształtowanie pola prędkości strumienia powietrza wpływającego z wentylatora osiowego. *Mechanika/AGH* 1999; 18(4): 499-507.

9. Gumuła S, Pytel K. Kształtowanie parametrów strugi powietrza za wentylatorem osiowym w kanale kwadratowym i w przestrzeni otwartej za kanałem. *Mechanics* 2005; 24(5): 246-251.
10. Hossein H, Liang C, Haitao Z, Vassilios K, Cem S, Tat-Hean G. A dual de-icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations. *Renewable Energy* 2015; 83: 859-870.
11. Idelchik I E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Jaico Publishing House 2005.
12. Jagodziński W. *Silniki wiatrowe*. Warszawa: PWT, 1959.
13. Karolewski B, Ligocki P. Rodzaje prądnic tarczowych. *Wiad. Elektrotechniczne* 2008; 8.
14. Karolewski B. Parametry modeli bezrdzeniowych prądnic tarczowych. *Elektro.inf.* 2011; 6.
15. Komarnicki P, Romański L, Bieniek J, Dębowski M, Pałka K. Wpływ regulacji pracy wentylatorów na równomierność rozkładu strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym. *Inżynieria Rolnicza* 2013; 2(143): 155-165.
16. Lee S, Son E, Lee S. Velocity interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine. *Renewable Energy* 2013; 54: 235-240.
17. Miąskowski W, Nalepa K, Pietkiewicz P, Komar W. Dwuwirnikowa mikrośilownia wiatrowa z osią poziomą. Olsztyn: Wyd. UWM, 2012; 485-492.
18. Mitelet L, Oprina G, Chichaia R, Nicokaie S, Nedelcu A, Popescu M. Wind Tunnel Testing for a New Experimental Model of Counter-Rotating Wind Turbine. *Procedia Engineering* 2015; 100: 1141-1149.
19. Pagnini LC, Burlando M, Repetto MP. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. *Applied Energy* 2015; 154: 112–121.
20. Selig M S, Guglielmo J J, Broeren A P, Giguere P. *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. Virginia: SoarTech Publications, 1995; 1.
21. Seungmin L, Eunkuk S, Soogab L. Velocity interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine. *Renewable Energy* 2013; 54: 235-240.
22. Seungmin L, Hogeon K, Soogab L. Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine. *Current Applied Physics* 2010; 10: 1567-1739.
23. Somers D M. S822 and S823 Airfoils. October 1992--December 1993. NREL Report No. SR-500-36342, 2005; 37.
24. Sung Nam J, Tae-Soo N, Ki-Wahn R. Aerodynamic performance prediction of a 30kW counter-rotating wind turbine system. *Renewable Energy* 2005; 30: 631-644.
25. Świtoński E, Jureczko M, Mężyk A. Optymalne projektowanie kompozytowych łopatek elektrowni wiatrowej. *Acta Mechanica et Automatica* 2007; 1.1(1).
26. Wei X, Pan Z, Liping L. A novel folding blade of wind turbine rotor for effective power control. *Energy Conversion and Management* 2015; 101: 52-65.